

文章编号:1673-0062(2016)03-0001-04

斜传低频阿尔芬波加热的粒子模拟

尹陈艳,李芙屹,向东,龚学余*

(南华大学核科学技术学院,湖南衡阳421001)

摘要:采用实验粒子模拟方法,研究了同等振幅条件,不同斜传角度下,斜传低频阿尔芬(Alfvén)波的加热;分析了加热过程中,质子动力学温度随斜传角度的变化,以及 X 、 Z 方向上粒子运动规律.模拟结果表明:低频阿尔芬波斜传角的增加会强化相混,从而有利于加热效率的提升;相混的提升是由于斜传加热在平行方向上产生的不均匀性导致的.

关键词:粒子模拟;低频 Alfvén 波;斜传波加热

中图分类号:053 **文献标识码:**A

Particle Simulation of Heating on Obliquely Propagating Low-frequency Alfvén Waves

YIN Chen-yan, LI Fu-yi, XIANG Dong, GONG Xue-yu*

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In this article, we use test particle simulation by the heating of magnetized plasma obliquely propagating low frequency Alfvén waves in different angle and with the same amplitude. During the heating process, we analyze the proton kinetic temperature and particle situation in X and Z direction with the change of propagating angle. It shows that: With the evolution of heating, obliquely propagating low frequency Alfvén wave will strengthen phase randomization process and cause the heating efficiency improvement. The reason for phase randomization improvement is that obliquely propagating low frequency Alfvén wave will turn to asymmetry in parallel direction.

key words: particle simulation; low-frequency Alfvén; obliquely waves heating

收稿日期:2016-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11375085);国家磁约束聚变能发展专项基金资助项目(2014GB108002; 2013GB107001);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2121;2016JJ6134);湖南省教育厅基金资助项目(14C0965);湖南省研究生科研创新基金资助项目(2015SCX01)

作者简介:尹陈艳(1979-),女,湖南株洲人,南华大学核科学技术学院讲师,硕士.主要研究方向:核聚变与等离子体物理.*通讯作者.

0 引言

低频 Alfvén 斜传波^[1-4]广泛存在于宇宙空间和聚变装置中,射频 Alfvén 波对等离子体加热具有重要意义^[5-6].D. Verscharen 等人^[7]从理论证明了 Alfvén 斜传波具有参数不稳定性;陈骝等人^[8]通过对单支斜传 Alfvén 波进行理论分析,发现斜传 Alfvén 波可以在质子共振频率以下实现低频非共振加热;陆全明等人^[9]进行斜传波多模加热时发现,当低频 Alfvén 波与背景磁场成角度入射时,垂直以及平行方向上的加热效率能够得到提升;孙继承等人^[10-16]进行单支波成角度入射时发现,低频 Alfvén 斜传波加热分为三个过程:粒子拾取阶段、相混阶段以及随机加热阶段,提出了斜传波角度由小增大时能够提升低频阿尔芬波加热效率,但对斜传角度变化时离子分布变化缺乏具体分析.

1 物理模型

在无碰撞等离子体中,等离子体比压值 $\beta=0.01$ 时,低频 Alfvén 波与背景磁场成角度 ψ 入射并传播,背景磁场方向为 $(\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{i}_z)$,模型中的离子仅受电磁力以及低频 Alfvén 波作用.其中低频 Alfvén 波的色散关系为: $\omega = kv_A$, ω 为波的频率, \mathbf{k} 为波矢, v_A 为波相速度,表达式为: $v_A = B_0 / (4\pi n_0 m_i)^{1/2}$,其中 n_0 为离子密度, m_i 为粒子质量.对于阿尔芬波的电场以及磁场的矢量可表示为 $\delta \mathbf{E}_\omega$ 和 $\delta \mathbf{B}_\omega$,其表达式如下:

$$\delta \mathbf{B}_\omega = \sum_{k=1}^N B_k [\cos \phi_k \cos(\psi) \mathbf{i}_x - \sin \phi_k \mathbf{i}_y + \cos \phi_k \sin(\psi) \mathbf{i}_z],$$

$$\delta \mathbf{E}_\omega = -v_A \mathbf{i}_x \cos(\psi) \times \delta \mathbf{B}_\omega \quad (1)$$

表达式中“ \pm ”代表右旋和左旋圆极化 Alfvén 波, \mathbf{i}_x 、 \mathbf{i}_y 分别为 x 、 y 方向的单位矢量, $\tan \psi = k_x/k_z$, ψ 为斜传角度, $\phi_k = \mathbf{k}_{xx} + \mathbf{k}_{zz} + \varphi$ 为波的相位,其中 φ_k 为波的初相位;模拟中仅考虑左旋圆极化 Alfvén 波.离子在外加磁场与 Alfvén 波的电磁场中的运动方程为

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q_i}{m_i} [\mathbf{v} \times (\mathbf{B}_0 + \delta \mathbf{B}_\omega) + \delta \mathbf{B}_\omega],$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v} \quad (2)$$

其中 q_i 、 m_i 分别为 i 类离子的电荷和质量.以质子作为试探粒子, Alfvén 波频率 $\omega = 0.025\Omega_p$ 远小于质子回旋频率,共振加热条件不满足,低频 Alfvén 波通过非共振加热等离子体.

初始时,216 000 个质子均匀分布于长度为

$1.6v_A\Omega_p^{-1}$ (Ω_p 为质子回旋频率)的 720 个网格中,系统总长度为 $11\ 520.0v_A\Omega_p^{-1}$.速度分布满足麦克斯韦分布,热速度为 $v_{thp} = 0.1v_A$ ($v_{thp} = \sqrt{KT_0/m_p}$), T_0 为质子初始温度, K 为 Boltzmann 常数.解质子运动方程,时间步长为 $\Delta t = 0.025\Omega_p^{-1}$;模拟中考虑波的二维空间传播及粒子的三维速度方向,采用周期性边界条件.

2 模拟结果及分析

设定质子为试探粒子,模拟单支左旋斜传低频 Alfvén 波对等离子体的加热过程(式(1)中取 $\psi_1 = 0, \psi_2 = \pi/20, \psi_3 = \pi/10$).在振幅一致的条件下,观察质子动力学温度和并行于背景磁场的平均速度的变化.质子动力学温度 T_k 表示平均单个粒子能量的增加, T_k 可由式(3)给出,模拟结果如图 1a 中 A1, A2, A3 所示.

$$T_k = \frac{1}{2} m_p \sum_{i=x,y,z} \langle (v_i - \langle v_i \rangle)^2 \rangle \quad (3)$$

其中, $\langle \cdot \rangle$ 表明对单个网格里的粒子速度求平均,再对所有网格中的粒子速度求平均,使用此种方法可以消除平均速度对温度造成的影响. T_k 、 $U_{//}$ 分别用 $m_p v_A^2/2$ 、 v_A 进行归一化.

图 1a 中曲线 A1、A2、A3 对应低频 Alfvén 波斜传角分别为 $\psi_1 = 0$ 、 $\psi_2 = \pi/20$ 和 $\psi_3 = \pi/10$ 时的单波质子动力学温度(振幅均为 $B_w^2/B_0^2 = 0.08$).振幅一致保证了以不同角度斜传的低频 Alfvén 波的波能密度 W/n_0 的一致性(W 为外加磁场的能量, n_0 为粒子密度).由图 1a 中曲线的斜率随斜传角的变化表明:斜传波加热时,质子将被加速获得更大的动能;随着斜传角度的增加,低频阿尔芬波的加热效率能够得到有效提升.这与陈骝等人^[11]的研究结果是一致的,说明低频 Alfvén 波斜传角度能够对粒子非共振加热过程的能量传递造成影响,其过程是通过提升加热效率进而使粒子随机运动所需的波振幅的降低来实现的.

与陈骝等人^[11]研究结果不同的是,模拟中观察了并行于外加磁场方向的非共振加热粒子平均速度,如图 1b 所示,曲线 B1、B2、B3 分别表示斜传角为 $\psi_1 = 0$ 、 $\psi_2 = \pi/20$ 和 $\psi_3 = \pi/10$ 时的单波质子流速,其中的扰动部分是非共振加热初期由于粒子回旋造成的微小波动.结果表明:低频斜传 Alfvén 波与背景磁场间的角度增加时,质子在平行方向被加速更为有效率,其非共振拾取阶段强化,大角度的低频斜传 Alfvén 波能够使粒子在平

行于背景磁场方向上获得更高的流速.

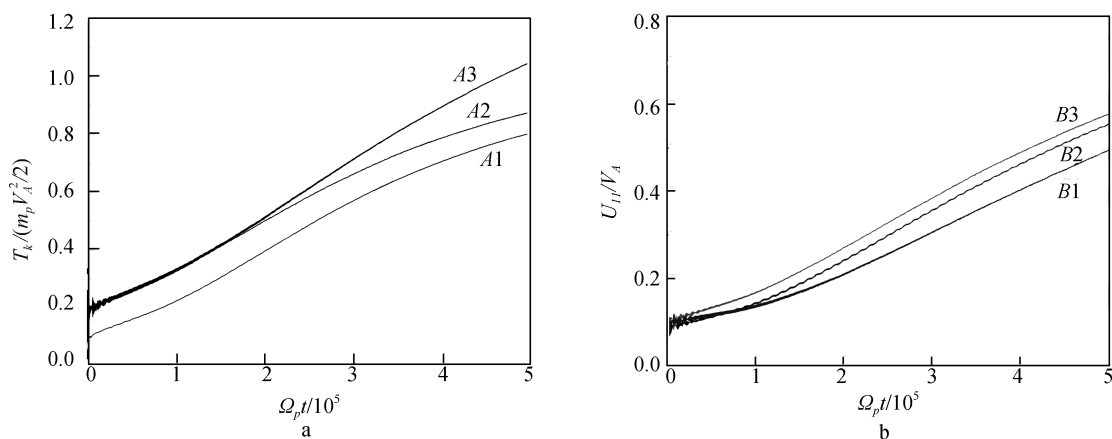


图 1 a 不同斜传角下单波质子动力学温度随模拟时间的演化

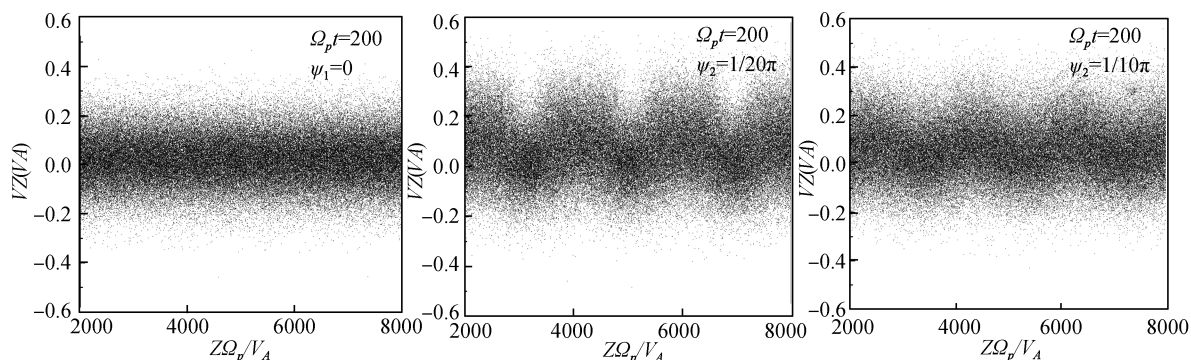
b 不同斜传角下单波质子平行于背景磁场方向的平均速度随模拟时间的演化

Fig.1 a Time evolution of proton kinetic temperature in monochrome wave with different ψ
 b Time evolution of average parallel velocity of protons in monochrome wave with different ψ

为了进一步研究低频斜传 Alfvén 波的非共振加热过程,对图 1a 中曲线 A1, A2 和 A3 以及非共振阶段(频率 $\omega = 0.025\Omega_p$, 波幅 $\sum_{i=1}^n B_w^2/B_0^2 = 0.08$, $\Omega_p t = 200$)相空间垂直和平行速度分布进行分析(如图 2 所示),研究低频 Alfvén 波斜传加热过程的粒子速度分布.图 2 表示斜传角分别为 $\psi_1 = 0$ 、 $\psi_2 = \pi/20$ 、 $\psi_3 = \pi/10$ 时在平行和垂直方向速度相空间粒子速度分布情况.图 2a 中的粒子在平行方向被均匀加热,在垂直方向被波拾取,随波运动;图 2b 和图 2c 中,随着斜传波角度的增加,可以观察到,粒子在时刻 $\Omega_p t = 200$ 平行及垂直相空间速度分布均出现了混沌现象,并且随着角度的增加,混沌效果能够被强化,这说明在低频阿尔芬斜传波加热下平行方向出现了不均匀性,此种不均匀性能够导致粒子的混沌运动,表明了斜传 Alfvén 波在非共振初

期波的拾取强化作用.

图 2b 和图 2c 的这种现像是由于斜传波加热能够强化粒子运动的各向异性所导致,模拟中,符合条件的斜传波在斜传过程中使得平行磁场出现不均匀,导致平行方向加热的不均匀强化,根据陆全明等人^[9]的各向异性导致混沌的理论,此种不均匀性使得斜传波在非共振阶段某些区域出现了垂直与平行温度各向异性的强化,进而强化对粒子的拾取.可以明显观察到,振幅恒定条件下,图 1 中符合斜传条件的单波加热曲线 $\psi_3 = \pi/10$ 所能达到的质子动力学温度远高于 $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = \pi/20$ 两种情况,并且图 2 中 $\psi_3 = \pi/10$ 的混沌程度高于前两种情况,进一步表明了斜传波加热强化各向异性的有效性,以及斜传角度的增加对非共振加热粒子运动随机化存在影响.



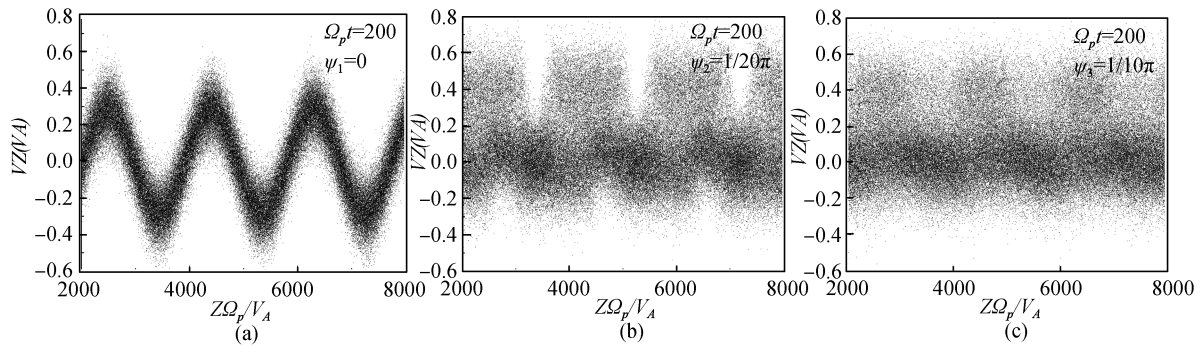


图2 随斜传角 ψ 变化的单波质子在相同时刻 ($\Omega_p t = 200$) 在 V_x-Z, V_z-Z 方向速度相空间分布

Fig.2 Proton distribution in phase-space V_x-Z and V_z-Z with different ψ at $\Omega_p t = 200$

3 结 论

本文以质子为试探粒子,在实验室坐标系模拟了单支与背景成角度传播的左旋圆极化低频 Alfvén 波的加热过程,具体分析了低频 Alfvén 波在不同斜传角度下,质子速度的空间分布、平行方向流速和动力学温度的变化情况,并对不同的情况进行了分析.研究表明:低频斜传 Alfvén 波能够有效提升加热效率,并且斜传角度的增加能够强化平行方向加热的不均匀性,从而强化粒子的混沌运动,此结论也理应符合其它类型的波.

参考文献:

- [1] Hollweg J V. The solar wind: Our current understanding and how we got here [J]. *Journal of Astrophysics & Astronomy*, 2008, 9(1/2): 217-237.
- [2] Kasper J C, Lazarus A J, Gary S P. Hot solar-wind helium: direct evidence for local heating by alfvén-cyclotron dissipation [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(26): 261103.
- [3] Del Zanna L, Matteini L, Landi S, et al. Parametric decay of parallel and oblique alfvén waves in the expanding solar wind [J]. *Journal of Plasma Physics*, 2014, 81(1): 325810102.
- [4] Unti T W J, Neugebauer M. Alfvén waves in the solar wind [J]. *Physics of Fluids*, 1968, 11(3): 563-568.
- [5] Carter T A, Brugman B, Pribyl P, et al. Laboratory observation of a nonlinear interaction between shear alfvén waves [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(15): 155001.
- [6] Wang B, Wang C B, Yoon P H, et al. Stochastic heating and acceleration of minor ions by alfvén waves [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10): 415-421.
- [7] Verscharen D, Bourouaine S, Chandran B D G, et al. A Parallel-Propagating alfvénic ion-beam instability in the high-beta solar wind [J]. *Astrophysical Journal*, 2013, 773(1): 773-779.
- [8] Guo Z, Crabtree C, Chen L. Theory of charged particle heating by low-frequency alfvén waves [J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(3): 257-260.
- [9] Lu Q, Li X. Heating of ions by low-frequency alfvén waves [J]. *Physics of Plasmas*, 2007, 14(4): 361-369.
- [10] Wang C B, Wu C S, Yoon P H. Heating of ions by alfvén waves via nonresonant interactions [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(12): 125001.
- [11] Lu Q, Chen L. Ion heating by a spectrum of obliquely propagating low-frequency alfvén waves [J]. *Astrophysical Journal*, 2009, 704(1): 743-749.
- [12] 孙继承, 高新亮, 陆全明, 等. The efficiency of ion stochastic heating by a monochromatic obliquely propagating low-frequency alfvén wave [J]. *Plasma Science and Technology*, 2014, 16(10): 919-923.
- [13] Wu C S, Yoon P H. Proton Heating via Nonresonant scattering off Intrinsic alfvénic turbulence [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(7): 075001.
- [14] Wang C B, Wei J D, Wang B, et al. Physical process for the pick-up of minor ions by low-frequency alfvén waves [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(5): 55201-55204(4).
- [15] Zhao G Q, Wu D J, Chen L, et al. Motion of electrons in the presence of obliquely propagating Alfvén waves [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2015, 357(1): 1-7.
- [16] Maneva Y G, Viñas A, Aranedo J, et al. Preferential heating of oxygen 5^+ ions by finite-amplitude oblique Alfvén waves [C] // SOLAR WIND 14: Proceedings of the Fourteenth International Solar Wind Conference. AIP Publishing, 2016, 1720: 040011.